

КТМ 204 України 244-94. – К., 1995. – 636 с.

2. Тепловая изоляция / Под ред. Г.Ф.Кузнецова. – М.: Стройиздат, 1995. – 421 с.

3. Справочник по гидравлике / Под ред. В.А.Большакова. – К.: Вища школа, 1984. – 343 с.

4. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.

Получено 30.08.2006

УДК 697.9

Б.М.ФЕДЯЙ

Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

РОЗРАХУНОК СУМАРНОГО ТЕПЛООБМІНУ В ТОПЦІ КОТЛА З ВТОРИННИМ ВИПРОМІНЮВАЧЕМ

Розроблено математичну модель для аналізу теплообміну в топці котла з вторинним випромінювачем, яка дає можливість в першому наближенні оцінити вплив геометричних характеристик вторинного випромінювача на ефективність теплообміну в топковому об'ємі.

Ситуація, що склалась сьогодні на ринку енергоносіїв, ставить власників теплових господарств в умови, за яких виникає необхідність переведення котлів з одного виду палива на інший при збереженні максимального коефіцієнта корисної дії (ККД).

Свого часу техніко-економічні розрахунки довели, що в деяких регіонах України більш доцільно, у порівнянні з вугіллям, в якості основного палива використовувати природний газ. Це призвело до того, що деякі котли та опалювальні печі, які були запроектовані для використання твердого палива, в процесі експлуатації переводилися з вугілля на природний газ.

Така зміна основного виду палива викликала суттєве падіння ККД котлів та опалювальних печей.

Якщо розглядати зміну ККД таких котлів як ДКВР, які ще й досі широко використовуються як в комунальних господарствах, так і в промисловості, то в даних котлах спостерігалось, головним чином, суттєве падіння ККД топкового пристрою. Якщо ККД топки котла ДКВР-10-13 на твердому паливі складав 58%, то на природному газі він знизився до 34%. Проте за рахунок розвиненої конвективної частини ця різниця в деякій мірі нівелювалася. На рис.1 проілюстровано зміну ККД топки котла ДКВР-10-13, працюючого на природному газі.

Визначити причини погіршення променевого теплообміну в топці котла при переведенні його з твердого палива на природний газ можна, порівнявши процеси теплообміну між димовими газами та екранами топки при горінні даних видів палива. Як правило, зниження ефектив-

ності використання променевої теплової енергії відбувалося за рахунок зменшення спектральної щільності випромінювання продуктів горіння, ступеня світимості факелу і, як наслідок, ступеня чорноти топки при горінні природного газу.

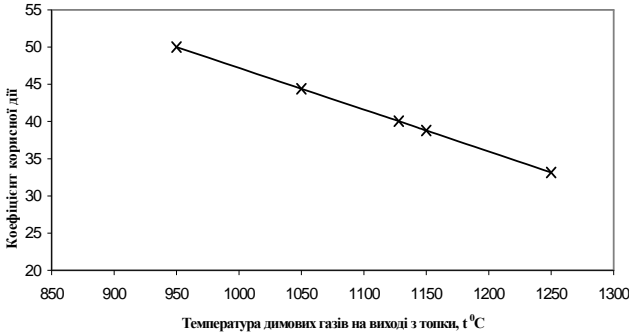


Рис. 1 – Коефіцієнт корисної дії топки котла ДКВР-10-13 залежно від температури димових газів на виході з топки

Тому з метою інтенсифікації процесів теплообміну за рахунок випромінювання, а значить, і підвищення ККД топки котла та для стабілізації факелу, зменшення втрат теплоти від хімічної неповноти горіння палива було запропоновано внести в полум'яний простір топкової камери вторинний випромінювач у вигляді насипу з вогнетривкої цегли.

Проте зазначене інженерне рішення не підкріплювалось теоретичними розрахунками, на основі яких можна було б оцінювати вплив вторинного випромінювача на ефективність теплообміну та доцільність його використання в топках котлів та опалювальних печей.

ККД топки котла можна визначити як відношення тепла переданого екранам за рахунок випромінювання до корисних тепловиділень в топковій камері, %:

$$\eta_T = \frac{Q_{\text{пром}}}{Q_{\text{тепл}}} = \frac{\varphi(B_P Q_H^P + Q_{\text{ПОВ}}^{\Phi} + Q_G^{\Phi} - Q_{\text{вид}})}{Q_{\text{тепл}}} \cdot 100. \quad (1)$$

Тут B_P – витрати газу на котел, $\text{м}^3/\text{с}$; φ – коефіцієнт збереження теплової енергії топкою котла, що визначається згідно з [1]:

$$\varphi = 1 - \frac{q_5^T}{100}, \quad (2)$$

де q_5^T – втрати тепла топкою в навколишнє середовище, визначають-

ся згідно з рекомендаціями [1]; $Q_{пром}$ – кількість теплової енергії, що передається від продуктів горіння палива до циркулюючого в екранах теплоносія за рахунок випромінювання, Вт; $Q_{тепл}$ – корисні тепловиділення в топці котла, що визначаються за формулою [1]

$$Q_{тепл} = B_P Q_H^P \frac{100 - q_3 - q_5^T}{100} + Q_{ПОВ}^{\Phi} + Q_G^{\Phi}; \quad (3)$$

Q_H^P – теплова спроможність палива, кДж/м³; $Q_{ПОВ}^{\Phi}$ – фізичне тепло повітря, що надходить до топки з газоповітряною сумішшю, Вт; Q_G^{Φ} – фізичне тепло газу, що надходить до топки з газоповітряною сумішшю, Вт; q_3 – втрати теплоти від хімічної неповноти горіння палива, %; $Q_{вид}$ – кількість теплоти, що видаляється з топки разом з димовими газами, температура яких дорівнює $t_{вид}$, Вт.

Температура продуктів горіння палива на виході з топки $t_{вид}$ визначається за допомогою [1].

Проаналізувавши формулу (1), можна зробити висновок, що одним з факторів, який дозволяє оцінити ефективність сумарного теплообміну в топці котла, виступає $Q_{вид}$, а саме $t_{вид}$.

Тому дослідити вплив вторинного випромінювача на умови теплообміну в топковій камері можна, проаналізувавши зміну температури димових газів на виході з топки залежно від наявності або відсутності вогнетривкої цегли.

Нормативний метод теплового розрахунку котельних агрегатів [1], який в практиці здобув широке поширення, не розглядає розрахунок теплообміну в топках з вторинним випромінювачем і не надає жодних рекомендацій щодо їх застосування [2].

Дані, наведені в [2], містять результати експериментальних порівняльних досліджень котлів при роботі з вторинним випромінювачем та без нього, теоретична ж модель, яка б дозволила аналізувати наведені результати – відсутня.

Отже, мета даної роботи – розробити математичну модель процесів теплообміну в топці котла з вторинним випромінювачем, яка б дала можливість визначити температуру димових газів на виході з топкової камери та оцінити вплив випромінювача на ефективність променевого теплообміну.

Розглянемо схему топки котла, в полум'яний простір якої внесено вторинний випромінювач (рис.2). Складемо загальний баланс енергії, як для топкової камери цілому так і по кожній поверхні, яка приймає участь в процесах теплообміну за рахунок випромінювання.

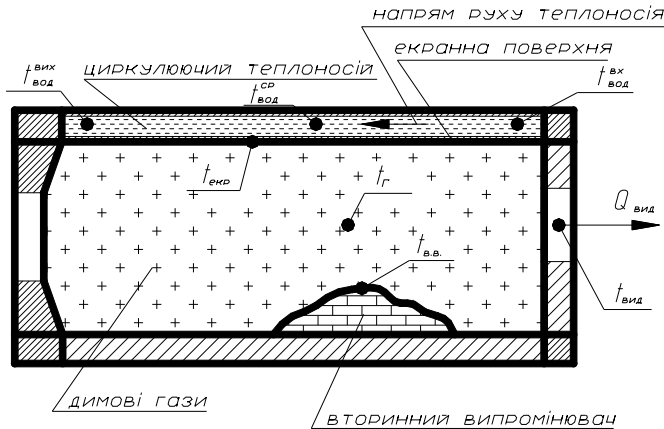


Рис.2 – Схема топкової камери

Попередньо вводимо низку спрощуючих передумов:

- теплообмін між димовими газами, екранами та вторинним випромінювачем відбувається лише за рахунок випромінювання, тобто конвективною складовою нехтуємо;
- топковий простір заповнений продуктами горіння газового палива, температура яких усереднена за об'ємом топки;
- теплопровідністю стінки екрану нехтуємо і приймаємо температуру екранів середньою по поверхні;
- втратами теплоти в навколишнє середовище також нехтуємо.

Розглянемо загальний тепловий баланс топкової камери.

У процесі реакції горіння газового палива виділяється певна кількість теплової енергії $B_p Q_H^P$. Частина цієї теплової енергії передається від димових газів до циркулюючого в топкових екранах теплоносія і збільшує його температуру від $t_{ex}^{год}$ до $t_{вих}^{год}$, а інша частина – $Q_{вид}$ відводиться з топки разом з димовими газами з температурою $t_{вид}$. Тобто можна записати:

$$B_p Q_H^P = Q_{вид} + Q_{екр}^{год}, \quad (4)$$

де $Q_{\text{екр}}^{\text{вод}}$ – кількість тепла, що надходить від поверхні екранів до циркулюючого в них теплоносія, Вт.

Розглянемо тепловий баланс вторинного випромінювача, схема теплових потоків наведена на рис.3.

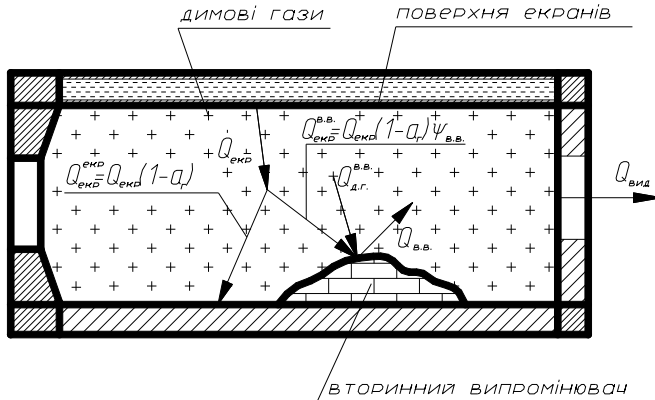


Рис.3

На поверхню вторинного випромінювача надходить променевий тепловий потік $Q_{\text{д.г.}}^{\text{в.в.}}$ від триатомних димових газів, що утворились в процесі горіння палива. Оскільки власне випромінювання будь-якого середовища залежить від природи тіла та його температури, то згідно з законами Стефана - Больцмана та Кірхгоффа для $Q_{\text{д.г.}}^{\text{в.в.}}$ можна записати [4]:

$$Q_{\text{д.г.}}^{\text{в.в.}} = ca_2 F_{\text{в.в.}} T_2^4, \quad (5)$$

де $Q_{\text{д.г.}}^{\text{в.в.}}$ – променевий тепловий потік, що надходить від димових газів на поверхню вторинного випромінювача, Вт; $F_{\text{в.в.}}$ – площа вторинного випромінювача, яка опромінюється димовими газами, м^2 ; T_2^4 – середня абсолютна температура димових газів, $^{\circ}\text{K}$ ($T_2 = t_2 + 273$).

Тут

$$t_2 = \frac{t_{\text{Т.Г.}} + t_{\text{вод}}}{2}, \quad (6)$$

де $t_{T.G.}$ – теоретична температура горіння палива, $^{\circ}\text{K}$; c – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла, $c = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{град}^4)$; a_z – ступінь чорноти димових газів, або поглинальна здатність димових газів, що враховує властивість триатомних продуктів горіння палива не тільки випромінювати, але й поглинати променеву теплову енергію, визначається за формулою [1]

$$a = 1 - e^{-kps}. \quad (7)$$

Тут k – коефіцієнт послаблення сумарного випромінювання CO_2 та H_2O , що визначається за рівнянням

$$k = \left(\frac{0,78 + 1,6r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{r_n S}} - 0,1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{(t_{\text{вуд}} + 273)}{1000} \right) r_n, \quad (8)$$

де $r_{\text{H}_2\text{O}}$ – вміст водяних парів в димових газах; r_n – вміст триатомних газів в продуктах горіння палива; $t_{\text{вуд}}$ – температура димових газів на виході з топки, $^{\circ}\text{C}$; p – парціальний тиск триатомних димових газів, ата.; s – ефективна довжина шляху променя, тобто така довжина шляху, при якій ступінь чорноти напівсферичного випромінювання дорівнює середньому ступеню чорноти випромінюючого об'єму, м. Визначається за формулою, наведеною в [3]

$$S = m \frac{4V_m}{F_{cm}}, \quad (9)$$

де m – коефіцієнт ефективності газового випромінювання, який дорівнює $0,85 \div 0,9$.

Оскільки топка котла – це замкнута випромінююча система, то крім димових газів у топковий простір теплову енергію випромінюють екранні поверхні нагрівання та вторинний випромінювач. Потік променевої теплової енергії, що надсилається будь-якою поверхнею в оточуючий простір, складається з суми власного та віддзеркаленого випромінень [4]. Виходячи з цього, променевий тепловий потік від екранів в об'єм топки $Q_{\text{екр}}$ дорівнюватиме:

$$Q_{\text{екр}} = \underbrace{ca_{\text{екр}} F_{\text{екр}} T_{\text{екр}}^4}_{\text{ВЛАСНЕ ВИПРОМІНЕННЯ ЕКРАНУ}} + \underbrace{\left(Q_{\text{д.з.}}^{\text{екр}} + Q_{\text{в.в.}}^{\text{екр}} + Q_{\text{екр}}^{\text{екр}} \right) (1 - a_{\text{екр}})}_{\text{ВІДДЗЕРКАЛЕНЕ ВИПРОМІНЕННЯ ЕКРАНУ}}, \quad (10)$$

де $a_{\text{екр}}$ – ступінь чорноти екрану; $F_{\text{екр.}}$ – площа променесприймаючої поверхні нагрівання екрану, м^2 ; $T_{\text{екр}}$ – абсолютна усереднена по поверхні температура екрану, $^{\circ}\text{K}$.

Частина променевого теплового потоку $Q_{екр}$ випромінюватиметься на поверхню вторинного випромінювача, а частина – на поверхню оточуючих екранів. Здатність триатомних димових газів послаблювати променевий тепловий потік призведе до того, що при його проходженні крізь прошарок продуктів горіння палива частина цього потоку поглинатиметься димовими газами, тобто від екранів на поверхню вторинного випромінювача надходитиме променевий потік $Q_{екр}^{6.6.}$, який визначатиметься залежністю

$$Q_{екр}^{6.6.} = Q_{екр} (1 - a_2) \psi_{6.6.}, \quad (11)$$

де $\psi_{6.6.}$ – доля повної кількості теплоти, що випромінюється поверхнею екранів та надсилається на вторинний випромінювач, або кутовий коефіцієнт випромінювання екранів на вторинний випромінювач, який для замкненої системи згідно [6] визначається за формулою

$$\psi_{6.6.} = F_{6.6.} / F_{екр}.$$

Таким чином, загальна кількість теплової енергії, що надходить на поверхню вторинного випромінювача, дорівнюватиме:

$$Q^{6.6.} = ca_2 F_{6.6.} T_c^4 + Q_{екр} (1 - a_2) \psi_{6.6.}. \quad (12)$$

Оскільки процес теплообміну, що протікає в топці котла, є сталим у часі, тобто стаціонарний, то кількість теплової енергії, що надходить на поверхню вторинного випромінювача $Q^{6.6.}$ дорівнює кількості теплоти, яку він випромінює в топковий простір, тобто $Q_{6.6.}$.

Виходячи з викладеного вище можна записати, що:

$$Q^{6.6.} = Q_{6.6.}. \quad (13)$$

Тепловий потік, що випромінюється вогнетривкою цеглою $Q_{6.6.}$, з якої виконано вторинний випромінювач, також складається з власного та віддзеркаленого випромінень, тобто:

$$Q_{6.6.} = \underbrace{ca_{6.6.} F_{6.6.} T_{6.6.}^4}_{\text{ВЛАСНЕ ВИПРОМІНЕННЯ}} + \underbrace{Q^{6.6.} (1 - a_{6.6.})}_{\text{ВІДДЗЕРКАЛЕНЕ ВИПРОМІНЕННЯ}}, \quad (14)$$

де $a_{6.6.}$ – ступінь чорноти вторинного випромінювача; $T_{6.6.}$ – абсолютна усереднена по поверхні температура вторинного випромінювача, $^{\circ}\text{K}$.

Розглянемо тепловий баланс екранної поверхні нагрівання.

На поверхню екранів за рахунок випромінювання надходить променевий тепловий потік від топкових димових газів. Тобто за аналогією

до формули (5) для променесприймаючої поверхні нагрівання можна записати:

$$Q_{\partial.г.}^{екр} = ca_г F_{екр} T_г^4. \quad (15)$$

В об'ємі топки, крім триатомних димових газів та екранів, в процесі теплообміну за рахунок випромінювання приймає участь й вторинний випромінювач, який випромінює в топковий простір променевий тепловий потік $Q_{в.в.}$. Проходячи крізь прошарок продуктів горіння палива, частина цього теплового потоку $a_г Q_{в.в.}$ поглинається, а інша частина $Q_{в.в.}(1 - a_г)$ надходить на поверхню екранів, тобто

$$Q_{в.в.}^{екр} = Q_{в.в.}(1 - a_г). \quad (16)$$

Тут $Q_{в.в.}^{екр}$ – променевий тепловий потік, що надходить на поверхню екранів від вторинного випромінювача, Вт.

Згідно з [6], якщо тіло, яке випромінює променевий тепловий потік, є вогнутим, то слід враховувати випромінювання „на себе”, тобто, як було зазначено раніше, частина променевого теплового потоку, що випромінюється екранною поверхнею надходить на прилеглі екрани. З урахуванням поглинальної здатності триатомних газів, по аналогії до рівняння (16), можна записати:

$$Q_{екр}^{екр} = Q_{екр}(1 - a_г) \psi_{екр}, \quad (17)$$

де $\psi_{екр}$ – доля загального випромінювання екранів, що випромінюється „на себе”, – кутовий коефіцієнт випромінювання екранів на себе, визначається за залежністю:

$$\psi_{екр} = (1 - \psi_{в.в.}).$$

Отже, сумарний променевий тепловий потік $Q_{сум}$, що надходить на променесприймаючу поверхню нагрівання екранів, дорівнюватиме:

$$Q_{сум} = Q_{\partial.г.}^{екр} + Q_{в.в.}^{екр} + Q_{екр}^{екр}. \quad (18)$$

Частина цього потоку поглинається променесприймаючою поверхнею та збільшує середню по поверхні температуру екранів, а інша частина віддзеркалюється від екранів та разом з їх власним випромінюванням надсилається до об'єму топки. Сума власного та віддзеркаленого променевих теплових потоків дорівнює $Q_{екр}$ і визначається за залежністю (10).

Збільшення температури екранів призводить до того, що між ек-

ранами та циркулюючим в них теплоносієм відбувається теплообмін за рахунок конвекції. Кількість тепла, що віддається від поверхні екранів до циркулюючого в них теплоносія, знаходимо за залежністю

$$Q_{екр}^{вод} = \alpha F_{екр} (t_{екр} - t_{ср}^{вод}). \quad (19)$$

Тут α – коефіцієнт теплопередачі від поверхні екрану до циркулюючого теплоносія, Вт/(м² °C); $t_{ср}^{вод}$ – середня температура циркулюючого в екранах теплоносія, °C:

$$t_{ср}^{вод} = \frac{t_{вх}^{вод} + t_{вих}^{вод}}{2}, \quad (20)$$

де $t_{вх}^{вод}$, $t_{вих}^{вод}$ – відповідно температура теплоносія на вході та виході з топкових екранів, °C.

У свою чергу кількість теплоти, яка надходить від екранної поверхні до теплоносія за рахунок конвекції дорівнює кількості теплоти $Q_{сприйн}$, що витрачається на підігрівання теплоносія витратою G від температури $t_{вх}^{вод}$ до температури $t_{вих}^{вод}$, тобто:

$$\alpha F_{екр} (t_{екр} - t_{ср}^{вод}) = Q_{сприйн}, \quad (21)$$

де

$$Q_{сприйн} = cG(t_{вих}^{вод} - t_{вх}^{вод}). \quad (22)$$

Тут G – кількість теплоносія яка циркулює в екранах, кг/год; c – теплоємність теплоносія, кДж/(кг °C).

Схема теплових потоків екранної поверхні наведена на рис.4.

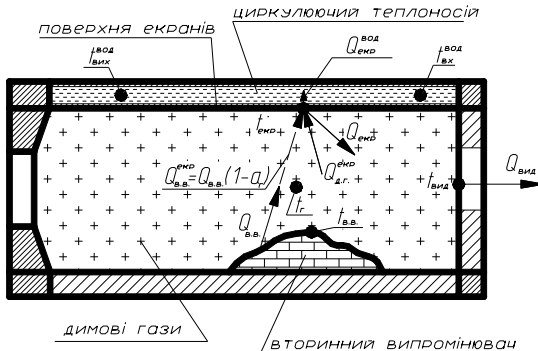


Рис.4

З огляду на викладене вище енергетичний баланс екранної поверхні нагрівання матиме вигляд:

$$Q_{екр} + Q_{екр}^{вод} = Q_{д.г.}^{екр} + Q_{в.в.}^{екр} + Q_{екр}^{екр}. \quad (23)$$

Тоді система рівнянь, що описує процес теплообміну за рахунок випромінювання в топковій камері при наявності в полум'яному просторі останньої вторинного випромінювача, матиме вигляд:

$$\begin{cases} B_p Q_p^H = Q_{вид} + Q_{екр}^{вод} \\ Q_{екр} + Q_{екр}^{вод} = Q_{д.г.}^{екр} + Q_{в.в.}^{екр} + Q_{екр}^{екр} \\ Q_{екр}^{вод} = Q_{сприйн} \\ Q^{в.в.} = Q_{в.в.} \\ t_{сп}^{вод} = \frac{t_{вих}^{вод} + t_{вх}^{вод}}{2} \\ t_г = \frac{t_{Т.Г} + t_{вид}}{2} \end{cases}.$$

Вирішуючи дану систему рівнянь, що описує процес теплообміну в топковій камері з вторинним випромінювачем, одержимо значення температури димових газів на виході з топки $t_{вид}$, температури циркулюючого теплоносія на виході з екранів $t_{вих}^{вод}$, усередненої по поверхні температури екранів $t_{екр}$, середньої за об'ємом температури продуктів горіння палива $t_г$, усередненої по поверхні температури вторинного випромінювача $t_{в.в.}$.

Таким чином, розроблена математична модель процесів теплообміну в полум'яному просторі топки котла з вторинним випромінювачем дозволяє оцінити в першому наближенні вплив останнього на ефективність променевого теплообміну в топковому об'ємі.

1. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. – М.: Энергия, 1973. – 295 с.
2. Эстеркин Р.И. Перевод промышленных котлов на газообразное топливо. – Л.: Энергия, 1967. – 208 с.
3. Mills, Anthony F. Basic heat and mass transfer. – Richard D. Irwin, Inc., Chicago, 1995. – 921 p.
4. Блох А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
5. Губар С.О. Методи і способи підвищення теплової та екологічної ефективності жаротрубних теплогенераторів малої потужності для локального теплопостачання: Ав-

тореф. дис. ... канд. техн. наук. – Макіївка: ДонДАБА, 2004. – 19 с.

Б.Блох А.Г. Теплообмен излучением. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.

Получено 19.10.2006

УДК 628.91

А.В.САПРЫКА, канд. техн. наук

Харьковская национальная академия городского хозяйства

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ г.ХАРЬКОВА

Экспериментально исследуется качество электроэнергии в осветительных сетях.

В последние годы проблемы качества электроэнергии и надежности электроснабжения приобретают особую актуальность, так как они являются одними из важнейших условий экономической и длительной эксплуатации осветительных установок. Исследование проблем качества электроэнергии показало, что суммы ежегодных убытков от низкого качества электроэнергии у большинства развитых стран составляют огромные суммы. Согласно исследованию, проведенному EPRI – Electric Power Research Institute (США) ежегодные убытки от сниженного качества электроэнергии составляют 15-24 млрд. долл. ежегодно, исследования проведенные CEA – Canadian Electrical Association убытки от провалов и внезапного повышения напряжения, от импульсов напряжения и гармоник составляют в Канаде 1,2 млрд. долл. ежегодно, в бывшем СССР – около 10 млрд. долл. На искусственное освещение в Украине используется свыше 15% электроэнергии, вырабатываемой всеми электростанциями, поэтому исследования качества электроэнергии на современном этапе в осветительных сетях являются актуальными.

Исследования отечественных специалистов и ученых [1-3] показывают актуальность и необходимость решения проблемы качества электроэнергии. Качество электрической энергии на месте производства не гарантирует ее качество на месте потребления до и после включения электроприемника (в данном случае осветительной установки).

Проблема электромагнитной совместимости промышленных электроприемников с питающей сетью остро возникла в связи с широким использованием мощных вентильных преобразователей, дуговых сталеплавильных печей, сварочных установок, которые при всей своей экономичности и технологической эффективности оказывают отрицательное влияние на качество электроэнергии. Отклонение показателей качества электроэнергии от нормативных оказывает большое влияние